

核図表の理解を深めるツールの開発

大阪工業大学
情報科学部 情報システム学科
B16-086 丸山健斗

2019年2月14日

目次

1	序論	3
1.1	目的	3
1.2	試み	3
1.3	本論文の構成	3
2	原子核	4
2.1	原子とは	4
2.2	原子核とは	4
2.3	周期表とは	5
2.4	同位体とは	6
2.5	核反応と結合エネルギー	7
2.6	核融合	7
2.7	核分裂	8
2.8	結合エネルギー	8
2.9	核崩壊と半減期	9
2.10	崩壊系列(放射性系列)とは	10
3	核図表	12
3.1	核図表とは	12
3.2	核図表の見方	14
3.3	周期表との関係	15
4	核図表アプリケーションの解説	16
4.1	データの処理	16
4.2	アプリケーション画面	17
4.3	各種機能	17
5	まとめ	22
6	参考文献	23

1 序論

1.1 目的

本研究では、高校物理の原子分野で登場する核図表のオンライン教材の作成を行った。核図表とは同位体原子核の集合で同位体原子、それらの結合エネルギーの強さの理解を行うのに本質的な役割をする。多くの人に原子核について興味を持ってもらう取っ掛かりになるようなアプリケーションになることを目標とした。教材としても利用できるように、見やすく、直観的に操作し易いものでターゲットを中高生向けに設定し作成することを心掛けた。また、テーマとして核図表を選択した理由は、全ての物質を構成するものとして身近に感じてもらいやすく、核反応や各崩壊系の理解、引いてはエネルギー問題などにも関係しているからである。

このアプリケーションを開発するにあたり、以下の点を重点においた。

- 多くの人に原子、原子核について興味を持って欲しい。
- 教育向け教材として教育に貢献したい。
- クリックなどの基本的な操作のみで直観的に使い易いものにしたい。

1.2 試み

原子に興味がある人も、そうでない人でも容易に理解できるものを作成するように心掛けた。今回のアプリケーション開発は、Java 言語に備わっている Applet を使用した。Applet の利点は以下のものが挙げられる。

- Web での公開が容易
- Java に標準で Appletviewer が備わっているため起動が Web でなくとも容易
- ほとんどの PC で利用が可能
- 操作が容易

これらのことから、簡単に利用できるアプリケーションを作成するために Applet を使用した。また、Applet は Java を導入することで使用ができるため、学生でも簡単に利用することができ Java の様々なライブラリをインストールすることも出来るので機能の拡張も容易である。

1.3 本論文の構成

本文の構成は次の通りである。まず、第 2 章で原子核に関する基礎知識と、本アプリの機能に関する核分裂等についての基礎知識について述べる。第 3 章では、本アプリで実際に再現している核図表についての基礎知識について述べる。第 4 章では、実際に作成したアプリケーションの説明を行う。第 5 章では、今回の研究のまとめを述べ、それ以降の章では参考資料等を記述している。

2 原子核

ここでは、本アプリの基礎知識の一つとなる原子と原子核について述べる。

2.1 原子とは

世の中のあらゆるものの構成要素である。原子は正の電荷を帯びた原子核と負の電荷を帯びた電子から構成されている。原子の大きさは約 100 億分の 1m ほどの大きさであるが、構成している電子による電子雲の広がりによる、もや状のようなものであるため境界面の判断が難しく化学結合している場合などによって異なるものである。

2.2 原子核とは

原子核の半径は原子の約 10 万分の 1 の大きさで出来ており、原子番号は原子核の陽子の数で決まっている。原子核は陽子+中性子の集合体である。そのため原子核の重さは陽子と中性子の数で決まる。また、これらの個数の合計を質量数と呼ぶ。

例えば He(ヘリウム) は 2 つの陽子と 2 つの中性子からなっている。これらことを示したものが図 1 である。

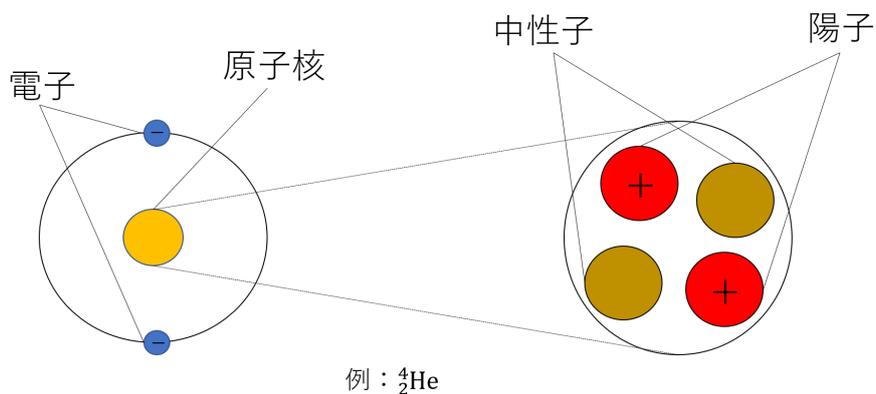


図 1 原子, 原子核

2.3 周期表とは

- 性質や特徴を考慮して元素を並べたもの。
- 左上から原子番号の順に並んでいる。
- 縦の並びは族と呼ばれるもので、元素を分類する上で最も重要なもので同じ族でよく似た性質を示す。同じ族に属する元素同士を同族体と呼ぶ。
- 横の並びは周期と呼ばれるもので、最外電子殻が内側から何番目であるかを表している。同じ周期のものは原子半径、イオン化エネルギーなどのパターンで似た傾向を示す。

図2が周期表である。



H 1																	He 2																														
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10																														
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18																														
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36																														
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54																														
Cs 55	Ba 56	La-Lu 57-71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86																														
Fr 87	Ra 88	Ac-Lr 89-103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118																														
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>La 57</td> <td>Ce 58</td> <td>Pr 59</td> <td>Nd 60</td> <td>Pm 61</td> <td>Sm 62</td> <td>Eu 63</td> <td>Gd 64</td> <td>Tb 65</td> <td>Dy 66</td> <td>Ho 67</td> <td>Er 68</td> <td>Tm 69</td> <td>Yb 70</td> <td>Lu 71</td> </tr> <tr> <td>Ac 89</td> <td>Th 90</td> <td>Pa 91</td> <td>U 92</td> <td>Np 93</td> <td>Pu 94</td> <td>Am 95</td> <td>Cm 96</td> <td>Bk 97</td> <td>Cf 98</td> <td>Es 99</td> <td>Fm 100</td> <td>Md 101</td> <td>No 102</td> <td>Lr 103</td> </tr> </tbody> </table>																		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71																																	
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103																																	

図2 周期表 (出典：[1])

2.4 同位体とは

同じ元素でも中性子の数が異なる原子のこと。安定な核種の安定同位体と不安定な放射能を持つ放射性同位体がある。同位体の表記は元素名に続き質量数を示すか、元素記号の左肩に質量数を付記する。また、同一元素の同位体は電子の状態が同じであるので化学的性質は同等であるが、結合や解離速度などで微小な差が表れる。

以下の図3が同位体の例である水素と重水素である。

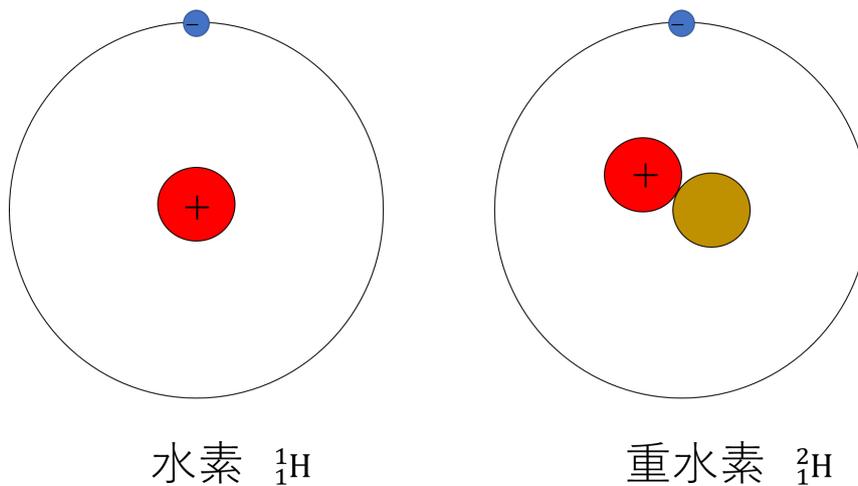


図3 水素と重水素

なおこれらの原子についての基本的な説明は、核図表を理解をするうえで非常に重要になっている。核図表については後ほど詳しく記述するが、同位体核種についてまとめたものが核図表となっている。

2.5 核反応と結合エネルギー

以下では、核に対して起こる核融合と核分裂についての基礎知識を述べる。また、アプリケーション内で実装している機能は後述する核崩壊の様子である。

2.6 核融合

原子同士が十分に近づくと、原子間に働く核力と呼ばれる引力が静電的な反発に打ち勝って一つに融合し新しい原子核になる反応である。例として、重水素、三重水素のような軽い元素が核融合を引き起こす際に、重水素と三重水素の合計質量より融合後の別原子の質量の方が軽くなる。この減少した質量がエネルギーとして放出される。また、これらの現象は宇宙で輝いている恒星の原理でもある。

以下は核融合の様子の一例の反応式と図である。H は水素 (Hydrogen)、He はヘリウム (Helium)、n は中性子 (neutron) である。

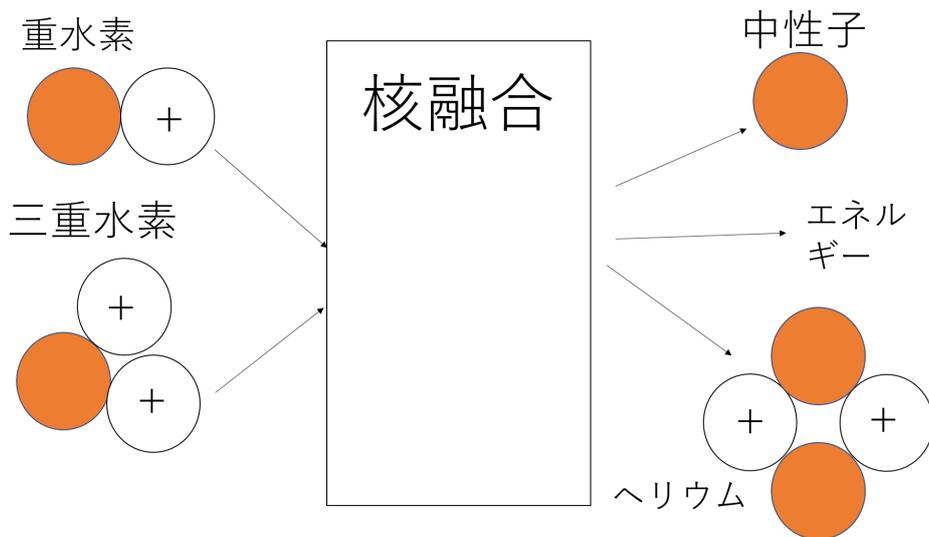
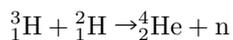


図4 核融合の例

2.7 核分裂

ウラン 235 など不安定な核に中性子を衝突させると、 β 崩壊と呼ばれる事象などによって2つの原子核に分かれる際に大量の熱を発生させる現象である。また、核分裂が起きてから2~3個の中性子が発生する。

5 また分裂したウランに対して中性子が衝突することにより連続的に核分裂反応を行うことができるようにしたものが原子炉である。

この発生した熱を利用してタービンを回転させることで発電するのが原子力発電である。

以下は核分裂の様子の一例の反応式と図である。Uはウラン (Uranium)、Yはイットリウム (Yttrium)、Iはヨウ素 (Iodine)、nは中性子 (neutron) である。

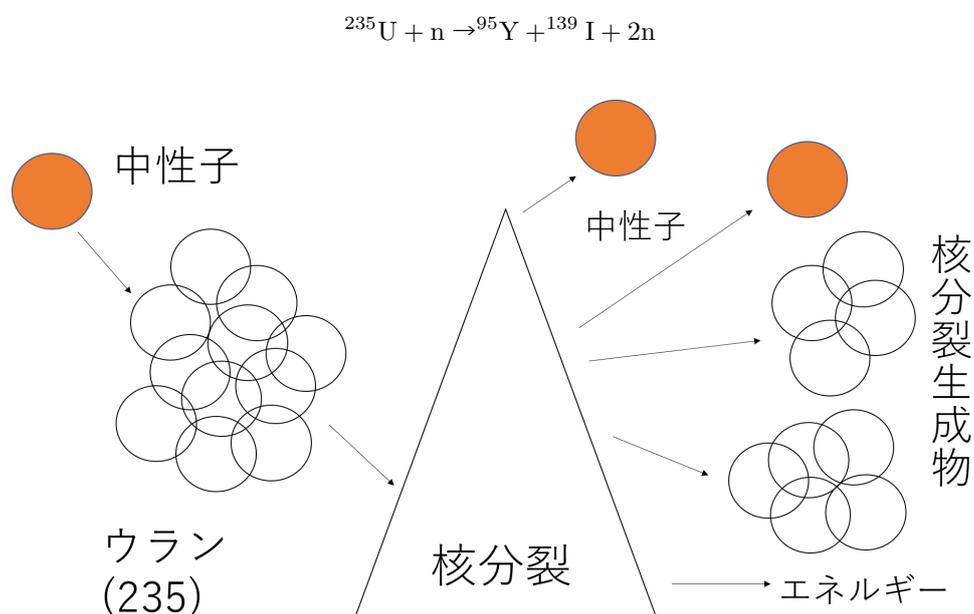


図5 核分裂の例

2.8 結合エネルギー

アインシュタインの特殊相対性理論によると結合エネルギーは下記の式に従う。 E はエネルギー、 m は質量、 c は光速である。

$$E = mc^2$$

上記の式から原子核の世界では質量そのものがエネルギーである。また、核融合や核分裂による質量欠損による原子核の結合エネルギーそのものであるということである。[2]

2.9 核崩壊と半減期

核の崩壊は放射性崩壊または放射性壊変と呼ばれる、不安定な原子核が放射線を出すことにより他の安定な原子核に変化する現象のことである。放射性崩壊を行う原子核は一定時間に一定の確率で起こり、原子数が半分になるまでの時間を半減期という。半減期は核の安定性を示す指標でもあり短ければ短いほど不安定な核である。

また、放射性崩壊は自然に発生するものであり放射性同位体ごとに定まる確率によって左右される物であり、物理的・化学的環境に依存しない。

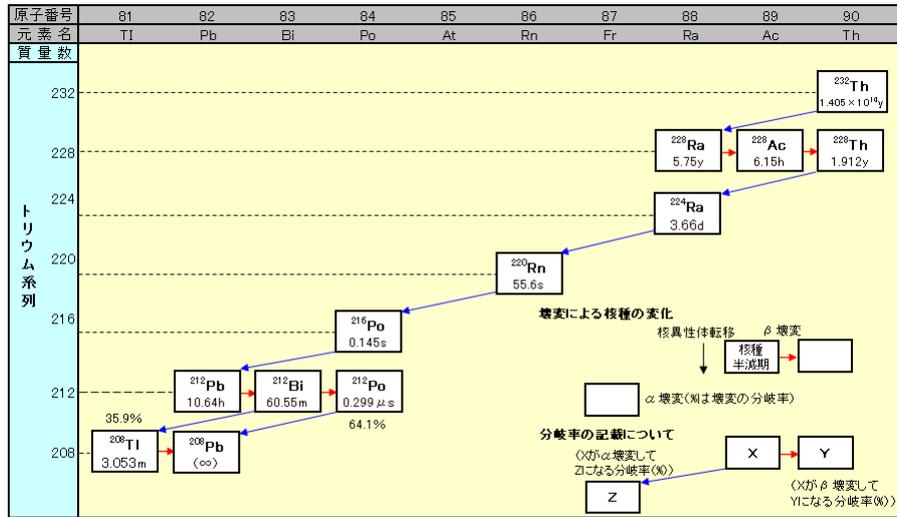
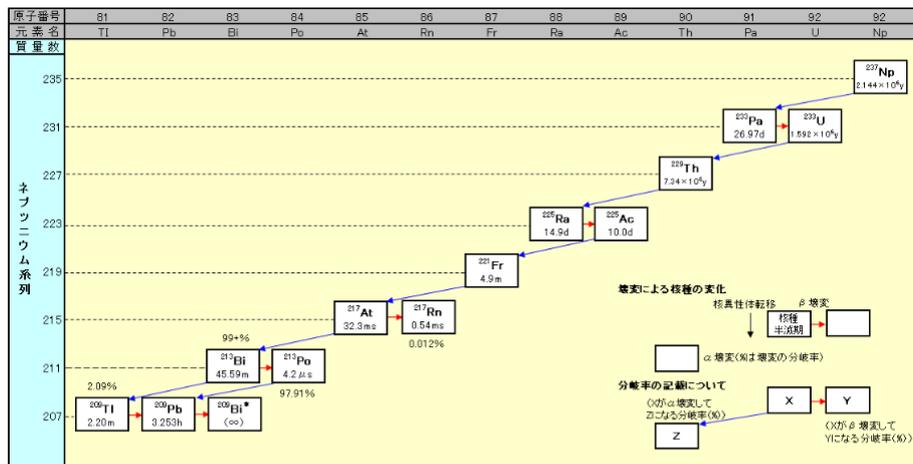


図1-3 天然放射性核種の壊変系列図(トリウム系列)(3/4)

[出典] 国立天文台(編):理科年表 2010年版、丸善(2009年10月)、p.468-469

図 8 系列の崩壊 (出典: [3])



* ^{207}Bi はα壊変する(半減期 1.9 × 10¹⁰年)と報告されている。
Nature 422, 876 (2003) による。

図1-4 天然放射性核種の壊変系列図(ネプツニウム系列)(4/4)

[出典] 国立天文台(編):理科年表 2010年版、丸善(2009年10月)、p.468-469

図 9 系列の崩壊 (出典: [3])

3 核図表

ここでは、実際に作成するアプリケーションの元となっている核図表の基礎知識について述べる。

3.1 核図表とは

周期表は原子番号順に並べた表なのに対して、核図表は同位元素を並べた表である。縦軸に原子番号つまり陽子の数を取り、中性子の数を横軸にとった原子核の表である。また、この図の高さ(谷の深さ)は原子核の結合エネルギーの強さを示しており高い(深い)ほど強い。

実際に使用したデータは ATOMIC MASS ADJUSTMENT[4] というサイトから陽子数、中性子数、結合エネルギーを以下のようなデータ群を取得した。

表1 使用データ

中性子数	陽子数	結合エネルギー
1	0	0.0
0	1	0.0
1	1	1112.283

・
・
・

結合エネルギーの強さの一定幅、周期表と同じ陽子数・中性子数の原子、鉄でファイル分けをし、gnuplot というテキストデータをプロットするアプリケーションで表示した。以下の図 10 から図 12 がそれぞれ、周期表に現れる原子、平面での核図表、三次元での核図表である。

ファイル分けを行った理由は色分けをし見易くするためである。

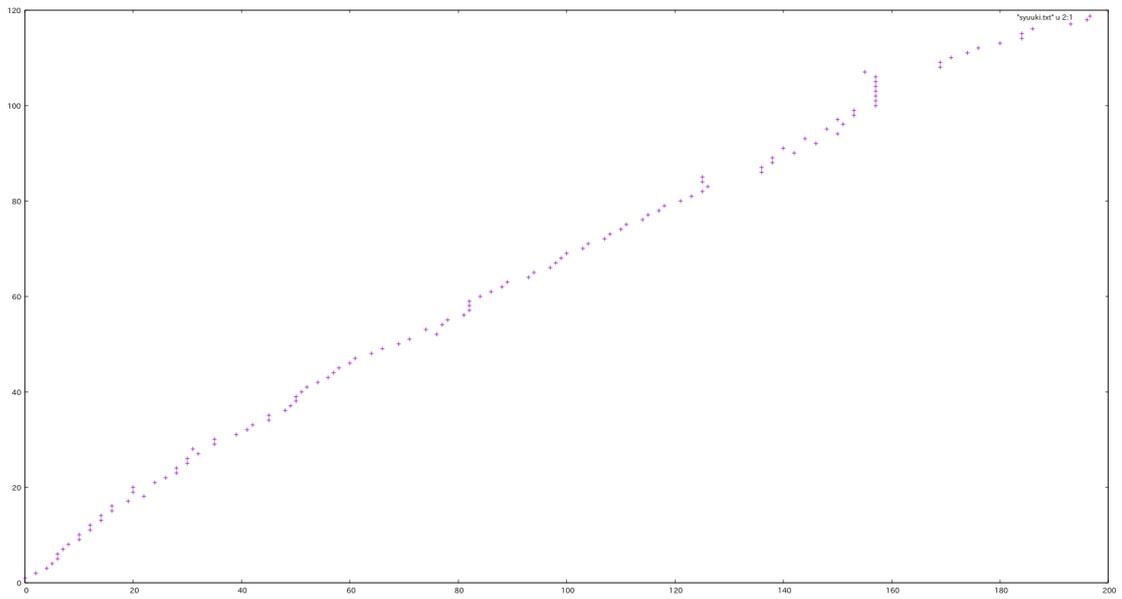


図 10 周期表にある 118 個の原子

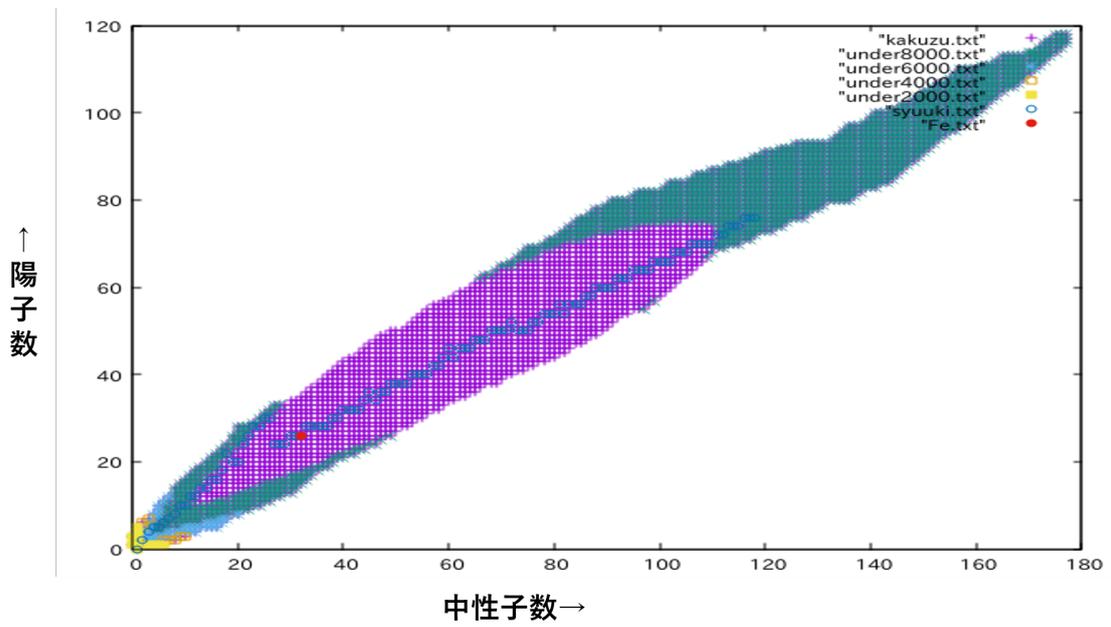


図 11 平面核図表

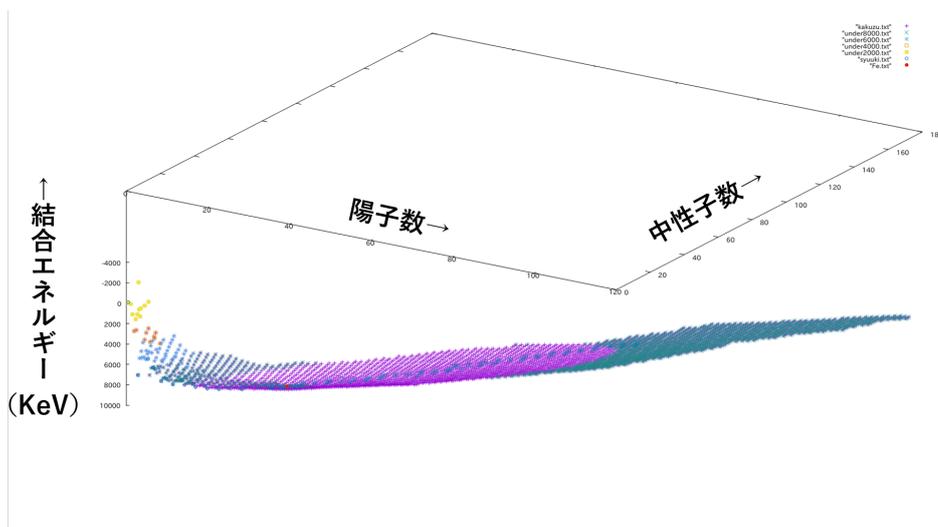


図 12 三次元核図表

3.2 核図表の見方

- 縦軸
陽子数で単純に元素の種類を示しており、上に向かうほど陽子の数が増えるので周期表と同じ順番で原子が現れる。
- 横軸
中性子数で右に向かっていくほど中性子の数が増えていくので、同じ陽子数で違う中性子数である同位元素を示している。

図 11 と図 12 は、ともに今現在発見できたものや人工的に作ることが可能な原子を示している。

- 黄色、結合エネルギーが最も低く不安定。
- 橙色、黄色の次に結合エネルギーが 4000KeV 以下で不安定。
- 水色、橙色の次に結合エネルギーが 6000KeV 以下で不安定。
- 緑色、水色の次に結合エネルギーが 8000KeV 以上で比較的安定している。
- 紫色、緑色の次に結合エネルギーが安定しているものが多い。
- 青色、周期表に載っている安定した核。
- 赤色、一番安定している Fe。

上記のもの以外にも理論上存在可能な未発見の原子が多数存在している。また、3次元核図表は原子として一番安定しているとされる Fe を底として、谷のような形をしていることからハイゼンベルグの谷と呼ばれている。

3.3 周期表との関係

図平面核図表で紺色に示されている核が、周期表で示されている 118 個の原子である。

4 核図表アプリケーションの解説

ここでは、実際に作成した核図表アプリケーションについて解説する。なおこのアプリケーションを作成するにあたって使用した数値は中性子数、陽子数、結合エネルギーの三種類である [2]。

アプリの機能構成は以下のようになっている。

- 平面核図表を表示
- 中性子数の軸から見た結合エネルギーと中性子数を軸にした平面図の表示
- 陽子数の軸から見た結合エネルギーと陽子数を軸にした平面図の表示
- 崩壊系列別に崩壊の様子を核図表でどのように辿るかを表示

4.1 データの処理

陽子数、中性子数、結合エネルギーを構造体配列でデータを以下の図 13 ように格納することで原子一つ一つについて扱いやすいように処理した。また、結合エネルギーは Double 型でデータが格納されているが、表示の処理の関係上四捨五入を行い小数点以下の繰り上げ、切り捨て処理をし Int 型にしている。

また、このデータの処理の段階で結合エネルギーの強さ、周期表原子、鉄に色分け処理を gnuplot と同様に行った。

今回構造体配列でデータを処理した理由は上記の原子一つ一つについて扱いやすくするのもあるが、構造体にすることによって原子一つを見たときに情報の追加が容易であり、名前の追加や原子の基本情報を追加することも可能で機能の拡充が簡単に行えるからである。

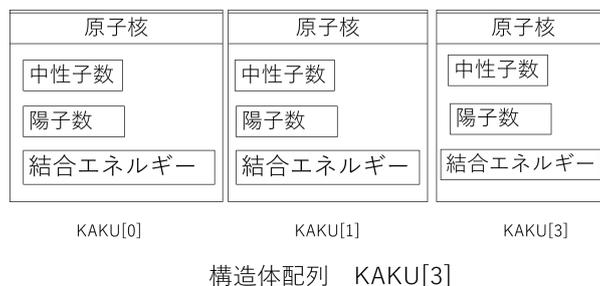


図 13 実際に使用した構造体配列の例

4.2 アプリケーション画面

以下の図 14 は実際に Appletviewer でアプリケーションを起動した画面である。

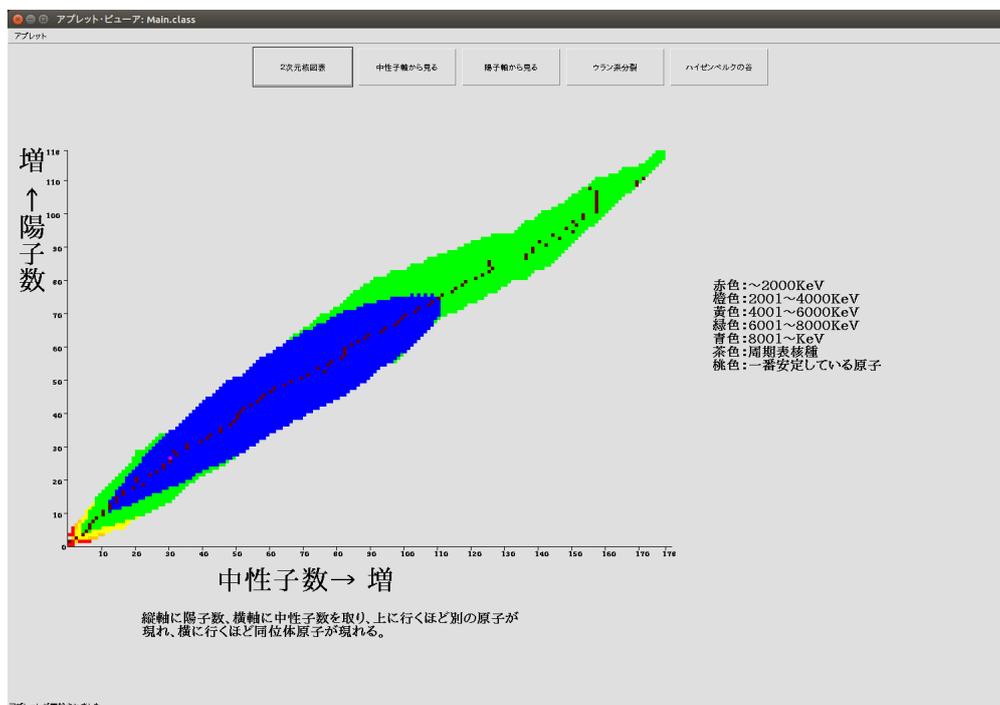


図 14 起動画面

まず、アプリを起動することで第 3 章で示した二次元核図表が表示される。ここで表示されている色分けは以下に示す通りである。

- 赤、橙、黄、緑、青色は第 3 章で示した結合エネルギーの強さを示しているものと同等のもの
- 茶色は周期表で表されている核種 118 個
- 桃色は一番安定とされている原子「Fe」

4.3 各種機能

作成した機能は大きく 2 つである。一つは中性子数や陽子数の軸から視点を変えて結合エネルギーを視認できるようにしたものである。もう一つが各崩壊系列に合わせて核分裂の様子を観察できるようにしたものである。

以下の図 15 は実際に視点を変更したもの、また分裂の様子が示されたものである。

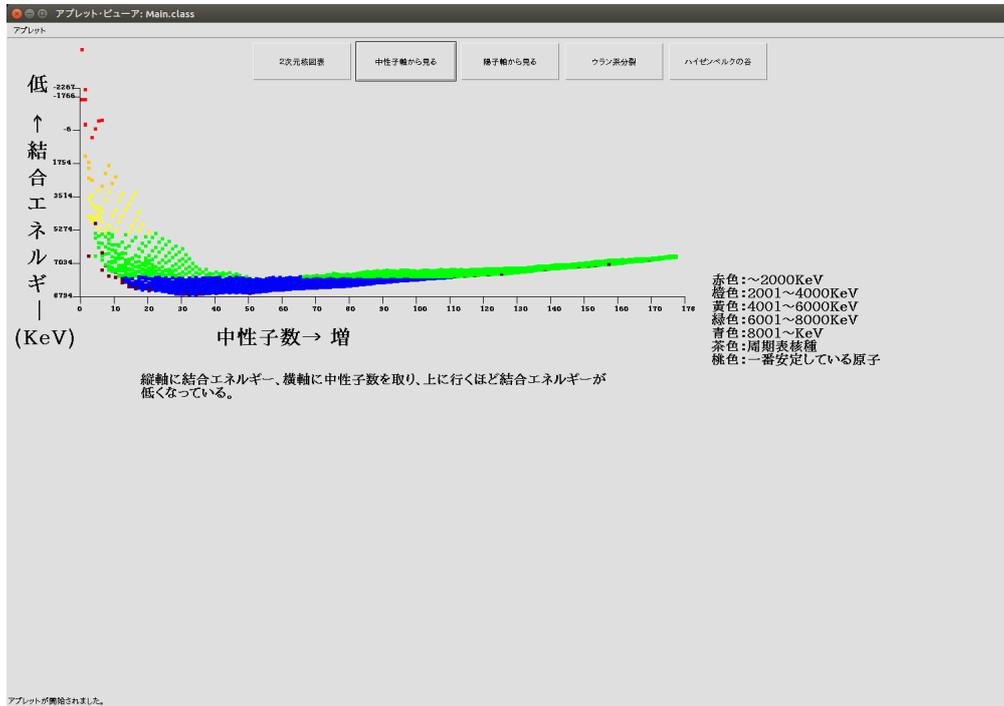


図 15 中性子数の軸から見た平面図

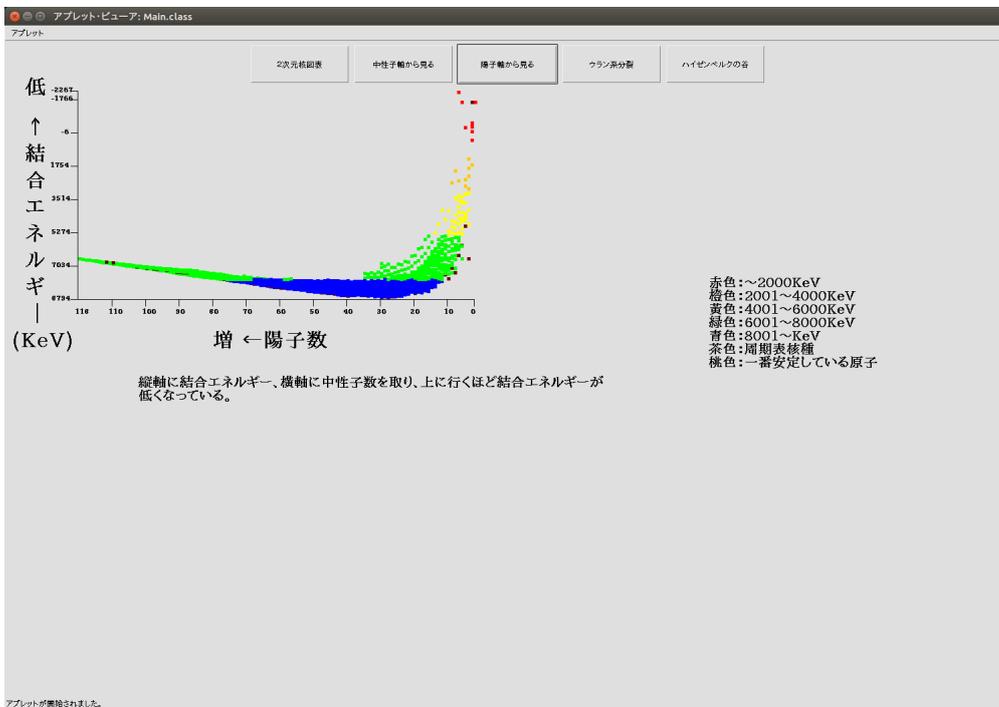


図 16 陽子数の軸から見た平面図

核の分裂の様子は起動時の画面からボタンをクリックした場合は以下の図のようになり、上記の中性子数と結合エネルギーや陽子数と結合エネルギーを軸にとった場合は、その視点から分裂の様子をアニメーションで見ることができる。

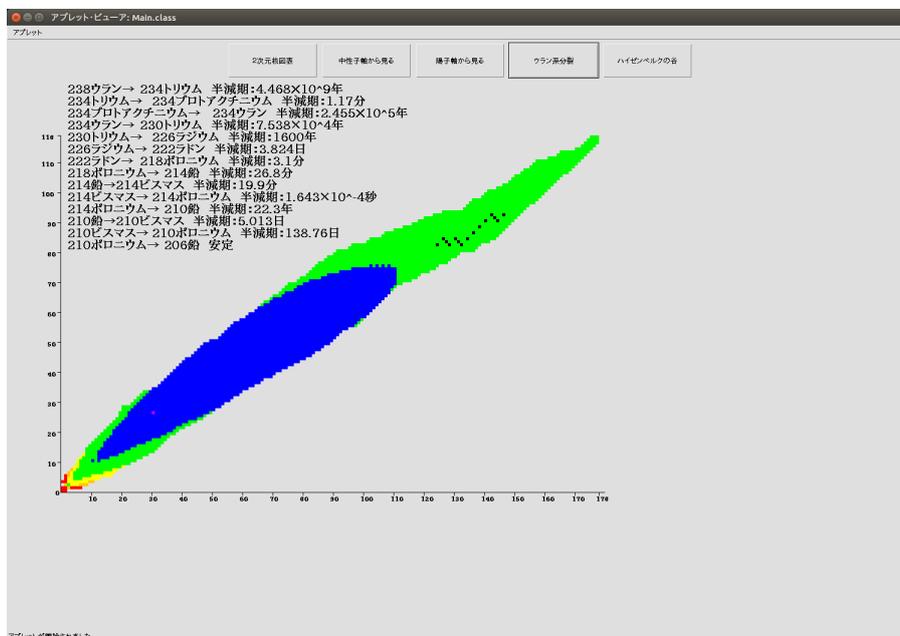


図 17 ウラン系核分裂

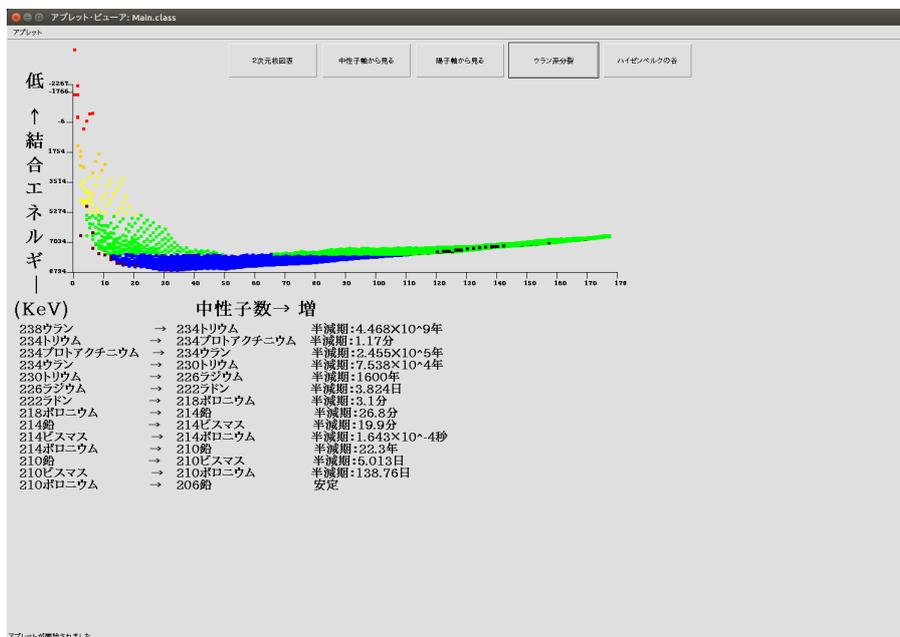


図 18 中性子数と結合エネルギーを軸にとったウラン系核分裂

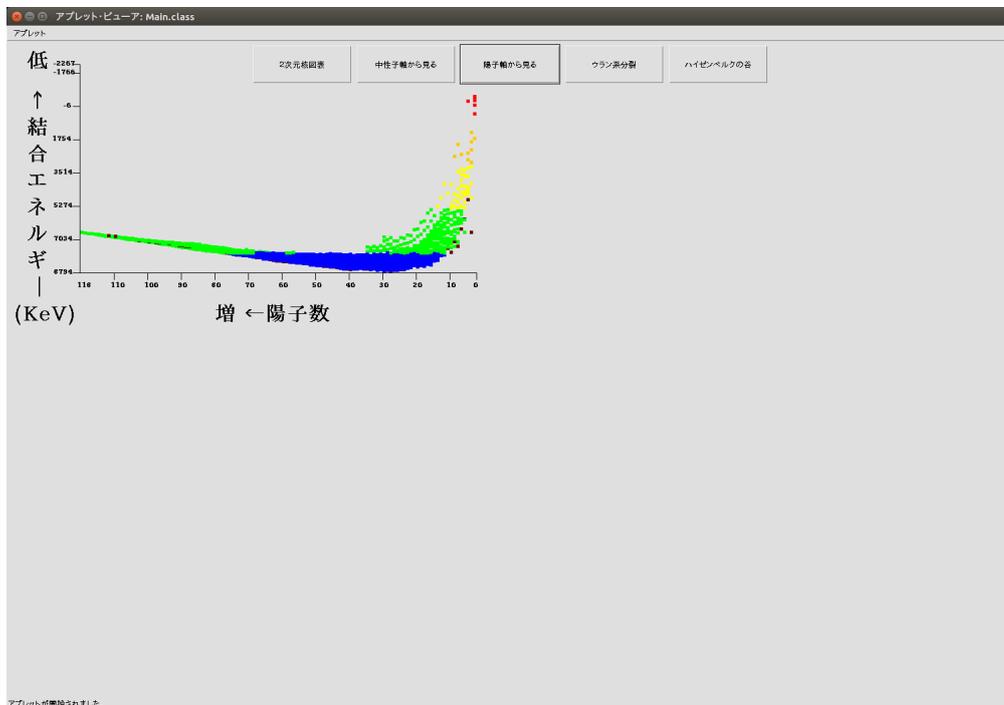


図 19 陽子数と結合エネルギーを軸にとったウラン系核分裂

これにより不安定な核がどの核へどんな半減期で崩壊するかを理解することが出来る。
 また、ハイゼンベルグの谷を可視化するボタンを作成した。これにより三次元核図表が実際に谷の形を形成していることが理解できるようにもした。

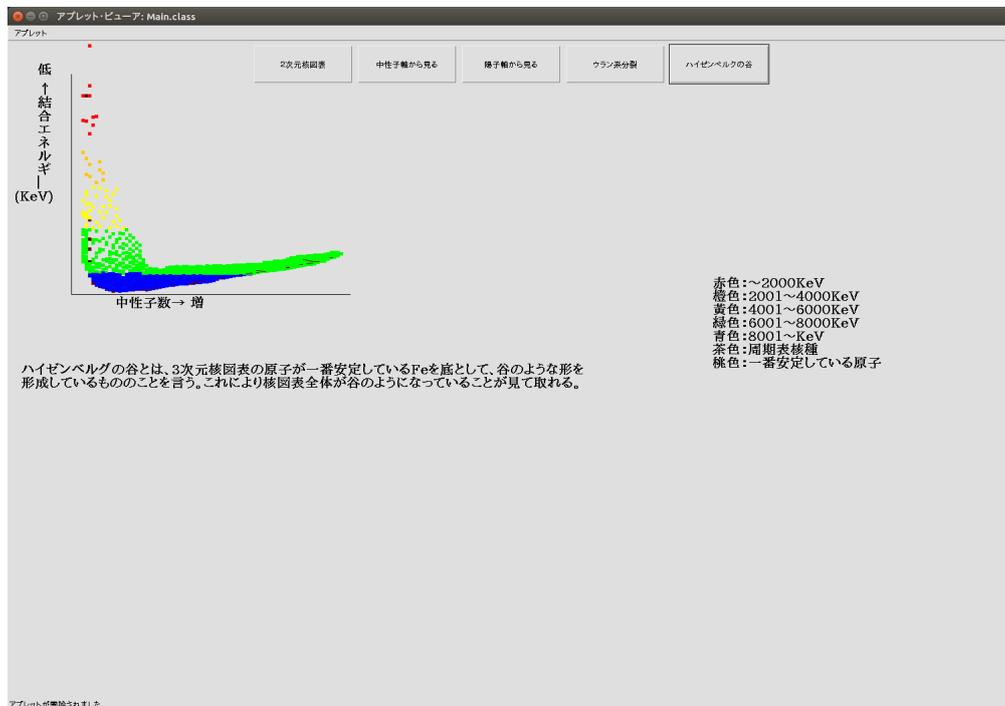


図 20 ハイゼンベルグの谷の再現

また、どの画面からでもどのボタンをクリックすることによって見たい画面へと移ることができる。

5 まとめ

本研究では、多くの人に原子・原子核について少しでも興味や知識を持ってもらい身近なものであることを感じてもらう目的があった。中学や高校までの知識では理解できないようなエネルギー問題や化学製品について、理解を深めることによってより身近なものとして感じる事が出来るのではないかと考えこのアプリケーションを作成した。

このアプリケーションを利用することで、核図表により核が同位体を含め 3000 種以上存在していることや、どの核がどれほどの安定度であるのか、不安定な核がどういった崩壊を行うのかなどがわかる。

また、計算上では存在可能な観測できていない原子もまだまだあるので、今後新たな発見そのものが出来る研究者になりたい、と思ってもらえることができるのではないかな。

そういったことを踏まえて、中高生向けの教材として作成したがより多くの人に利用してもらえようように、操作が容易で見易いものを心掛けて作成した。Web での公開も予定しているので日本だけでなく、英語化をして世界で使っていただけると幸いである。

6 参考文献

- [1] メンデレーエフ周期律発見 150 周年 国際周期表年 2019、私たちの元素-エッセイコンテスト、(<https://iypt.jp/about/top.html>)
- [2] 小浦 寛之、Three-dimensional nuclear chart—understanding nuclear physics and nucleosynthesis in stars、(2014-)
- [3] 壊変系列図、主な放射性核種の半減期 (18-03-01-01)、(https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_18-03-01-01.html)
- [4] ATOMIC MASS ADJUSTMENT、(<https://www-nds.iaea.org/amdc/ame2016/mass16.txt>)